

補助事業番号 2024M-414

補助事業名 2024年度 原子間力顕微鏡向け広可動ナノポジショナの開発 補助事業

補助事業者名 福井大学 伊藤慎吾

## 1 研究の概要

ナノレベルでの試料の測定や加工を実現する原子間力顕微鏡の動作範囲を現行の数十マイクロメートルから10倍以上拡張するため、次世代精密アクチュエータとして期待させるハイブリッドリラクタンスアクチュエータを使ったZ軸ナノポジショナを開発し、原子間力顕微鏡の製作に使用した。Z軸ナノポジショナの開発では、ホールセンサを使った磁束制御を提案し、従来技術では難しかった低周波数における磁気ヒステリシスの低減に実験的に成功した。また、原子間力顕微鏡の測定により、Z軸ナノポジショナの共振現象等が今後解決すべき課題であることを明らかにした。

## 2 研究の目的と背景

原子間力顕微鏡は、先端の鋭い探針を微細に動かすことで、ナノレベルの画像撮影、および試料の超微細加工を実現する。原子間力顕微鏡は水中や空気中等のあらゆる環境で使用できるなど、他の高解像度顕微鏡にはないユニークな特徴を持つ。この探針を動かすナノポジショナに圧電素子が最も使われている。ところが、ナノポジショナの実用的な可動範囲は、数十マイクロメートル程度までで、AFMの測定範囲や作業範囲が制限される。特に、試料が熱や外力などで変形すると、連続的な計測やリアルタイムな変化の観察が困難になる。

特に垂直(Z軸)方向の広い測定範囲と加工範囲を持つ原子間力顕微鏡を実現するため、可動範囲が広く高速なナノポジショナを開発し原子間力顕微鏡に利用することを本事業の目的とする。この目的のため、従来の圧電素子に代わるハイブリッドリラクタンスアクチュエータ(HRA)を使ったナノポジショナを提案し、原子間力顕微鏡と共に製作した。

HRAは高い位置決め精度、高推力及び広可動範囲を実現する電磁アクチュエータであるが、HRAの持つ磁気ヒステリシスの非線形性や負の剛性の測定に課題があった。そこで、低周波数でも動作するホールセンサと磁気制御による磁気ヒステリシス補償や剛性推定の研究も行った。

## 3 研究内容

(1) Z軸ナノポジショナの製作と原子間力顕微鏡の開発(<http://mech.u-fukui.ac.jp/~ito/r2.html>)

図1は本研究で開発したZ軸ナノポジショナと原子間力顕微鏡を示す。探針を上下方向に動かすため、HRAはコイルと永久磁石により磁束を作り出しリラクタンス力を発生させる。このコイル巻き数や永久磁石のサイズ等を有限要素法により決定した。また、磁束を案内する鉄心の磁気ヒステリシスを低周波数でも検知するため、磁気センサであるホールセンサを組み込んだ。また、原子間力顕微鏡のサンプルを走査するため、XYスキャナも本研究で設計及び製作した。この原子間力顕微鏡でサンプルのラインプロファイルを測定し結果を分析したところ、床振動等の外乱やZ軸ナノポジショナの共振等が今後の課題であることが明らかになった。

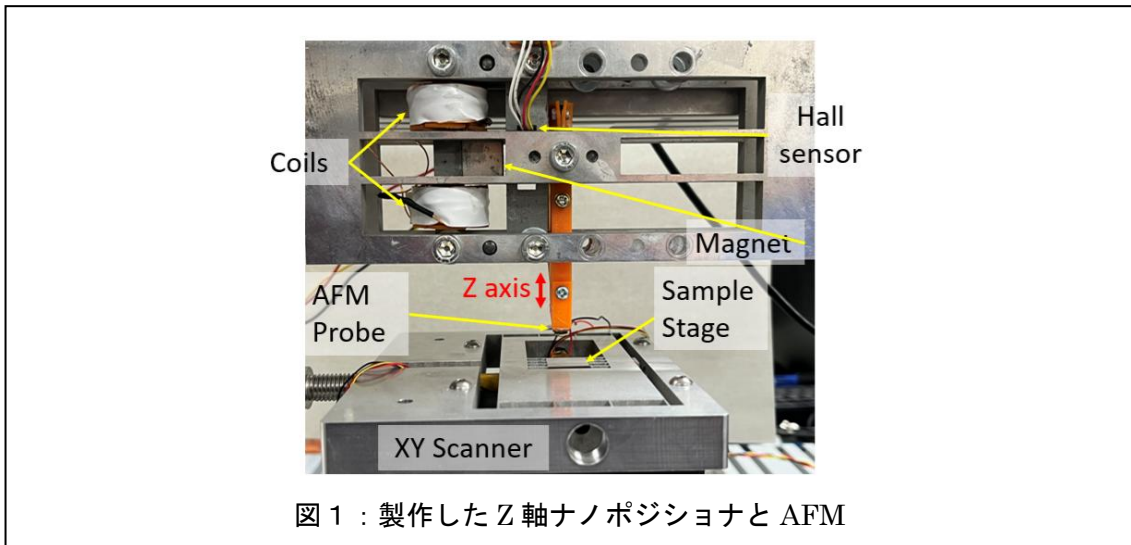


図 1 : 製作した Z 軸ナノポジショナと AFM

## (2) 磁気ヒステリシス補償

HRAの磁気ヒステリシスの対策として、組み込んだホールセンサと磁気制御による磁気ヒステリシス補償を本研究で提案した。この効果を実証するため、従来の電流制御との比較実験を行った。この実験では、比較的低い10Hzの周波数において約 $10\mu\text{m}$ の範囲で上下するよう正弦波をZ軸ナノポジショナの指令信号として入力し、可動子位置をレーザ測長計で計測した。結果を図2に示す。従来の電流制御(図2b)では非線形性が3.2%のヒステリシスのループが見られる。一方、今回提案したホールセンサを使った磁気制御では(図2a)ではヒステリシスループが小さくなり、非線形性を1.8%まで減少させることができた。結果として、これまで困難であった低周波数におけるHRAのヒステリシス補償に成功した。

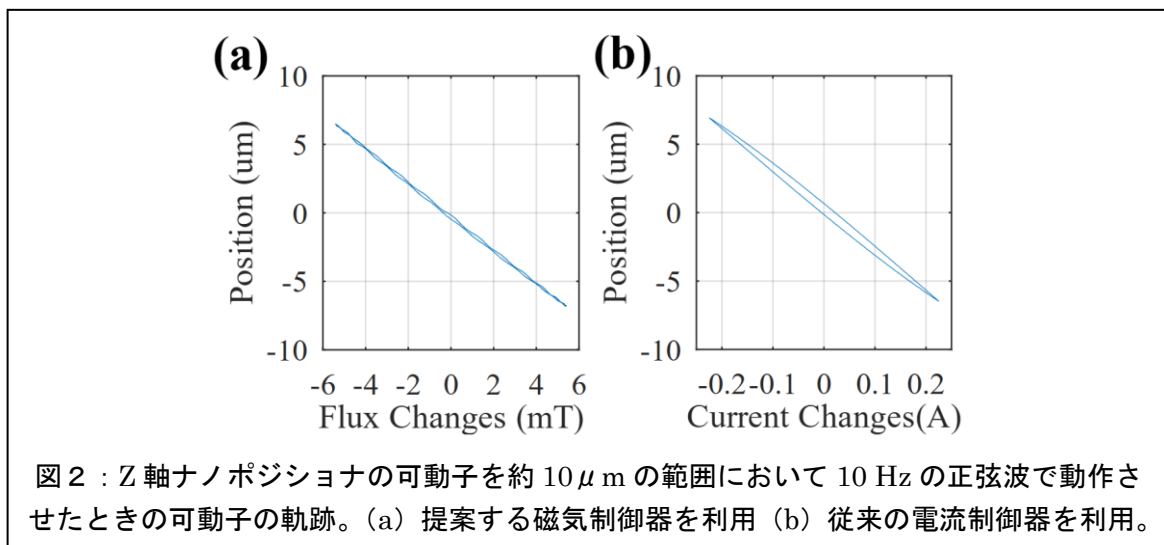


図 2 : Z 軸ナノポジショナの可動子を約  $10\mu\text{m}$  の範囲において 10 Hz の正弦波で動作させたときの可動子の軌跡。(a) 提案する磁気制御器を利用 (b) 従来の電流制御器を利用。

### (3) 非線形カルマンフィルタによる剛性推定

HRAの持つ磁気的な剛性は、エネルギー効率や位置決め精度等の性能に影響を与える。これまでは、調整のため剛性を周波数応答により数分以上かけて測定していた。この作業の短縮する非線形カルマンフィルタを利用した剛性推定器を開発した。実験的な評価により、推定精度が1kN/m程度であることや推定器の収束が速いなどの性能を明らかにすることができた。さらに、収束の速さからリアルタイムでの推定が可能であることもわかった。

### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

広範囲におけるナノレベルでの加工や修理、調整が可能になる。例えば、撥水や殺菌効果を持つ機能的な表面をナノ構造で実現できることが知られている。このような表面の高性能化や新機能の実現が期待できる。

### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究の低周波数におけるヒステリシス補償により、HRAは次世代精密アクチュエータとしての実用化にさらに一步近づいた。また、本研究の成功により、磁気センサを埋め込んだアクチュエータの有用性が明らかになり、磁気センサの新たなアプリケーションを創出した。

### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

[1] N. Takeuchi, K. Takahashi, T. Fukuyama, A. Yamashita, and S. Ito, "Hysteresis Compensation by Flux-Controlled Hybrid Reluctance Actuator with integrated Hall Sensor," IEEJ SAMCON, pp. 11-14, 2025.

[2] K. Takahashi, S. Ito, "Real-time Estimation of High-precision Actuator's Variable Stiffness for Vibration Isolation," IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Accepted.

### 7 補助事業に係る成果物

#### (1) 補助事業により作成したもの

AFM向けZ軸ナノポジショナ及びAFM (<http://mech.u-fukui.ac.jp/~ito/r2.html>)

#### (2) (1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 福井大学学術研究院工学系部門

(フクイダイガクガクジュツケンキュウインコウガクケイブモン)

住 所: 〒910-8507

福井県福井市文京3-9-1

担 当 者: 教授 伊藤慎吾(イトウシンゴ)

担 当 部 署: 機械工学講座(キカイコウガクコウザ)

E - m a i l: [ito@u-fukui.ac.jp](mailto:ito@u-fukui.ac.jp)

U R L: <http://mech.u-fukui.ac.jp/~ito/index.html>